УДК 621.923.01

АБРАЗИВНО-ЭКСТРУЗИОННАЯ ОБРАБОТКА. СОВРЕМЕННЫЙ УРОВЕНЬ, ПРОБЛЕМЫ И НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ

В.А. Левко

Сибирский государственный аэрокосмический университет им. акад. М.Ф. Решетнева, г. Красноярск
E-mail: levko@sibsau.ru

Дан обзор современного уровня абразивно-экструзионной обработки. Показано, что отсутствие теоретических основ является основной из основных проблем, возникающих при внедрении этого способа финишной обработки в производство.

В машиностроении все более широкое применение получают детали со сложнопрофильными поверхностями. В первую очередь, к ним относят детали летательных аппаратов (ЛА), двигателей внутреннего сгорания (ДВС), дизельных двигателей, а также инструментальной оснастки для металлургического и заготовительного производств.

Формообразование и обеспечение качества изготовления указанных поверхностей требует сложного движения исполнительных органов обрабатывающего оборудования или применения сложных по форме (фасонных) инструментов. В ряде случаев формообразование возможно только специальными методами литья или электроэрозионной обработкой с последующей финишной обработкой [1].

Выбор вида финишной обработки имеет большое значение, т. к. полученные вышеперечисленными методами поверхности имеют дефектный слой, характеризующийся высоким уровнем остаточных напряжений, деформационного упрочнения (наклепа) и неровностей поверхности, что снижает их надежность и работоспособность, сопротивление усталости и прочность.

Финишная обработка (ФО) сложнопрофильных поверхностей традиционными способами обработки практически не применяется из-за затрудненного доступа инструмента к обрабатываемой поверхности. Поэтому для этих целей используют специальные технологии ФО, в которых в качестве инструмента применяется поток разнообразных жидкостных или уплотненных сред, несущих рабочие элементы, которые при перемещении вдоль обрабатываемой поверхности вступают в контакт с ее неровностями. Наряду с ними, для улучшения качества сложных поверхностей применяется и ручная доводка.

Одним из новых видов такой обработки является абразивно-экструзионная обработка (АЭО), заключающаяся в снятии слоя материала с поверхности обрабатываемого канала при перепрессовывании под давлением через него рабочей среды, состоящей из вязкоупругого основания, наполненного твердыми рабочими элементами (чаще всего – абразивные или алмазные зерна). При этом формируется направленный поток, на поверхности которого расположены абразивные зерна. Отслеживая за внутренней поверхностью канала, поток обеспечивает взаимодействие микровыступов абразивных зерен с микронеровностями поверхности (рис. 1). При этом реализуется широкий спектр типов контактирования, который и определяет характер обработки поверхности по всей ее длине. В ряде российских работ этот метод получил название экструзионное хонингование или экструзионное шлифование.

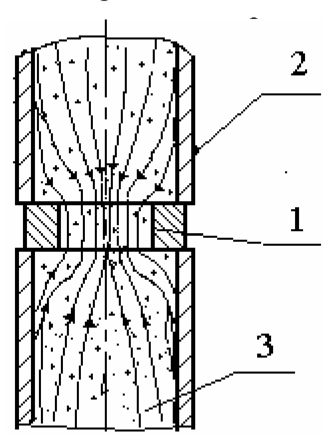


Рис. 1. *Схема процесса абразивно-экструзионной обработки: 1) обрабатываемая деталь; 2) цилиндр подачи рабочей среды; 3) рабочая среда*

Для практической реализации этого метода необходимы установка для перепрессовывания рабочей среды определенного состава и ряд дополнительных устройств и приспособлений для закрепления детали при обработке и формирования потока среды через деталь. Важной составляющей технологического процесса АЭО является изготовление полимерной основы рабочей среды и ее равномерное наполнение абразивным зерном, а также очистка и промывка обработанной детали.

В настоящее время в США, где этот процесс имеет название Abrasive Flow Machining, а также в некоторых других странах, процесс АЭО получает все более широкое применение, вытесняя гидроабразивную обработку. Это тенденция особенно заметна в производстве сложнопрофильных деталей и металлургической оснастки, где требуется уменьшение дефектного поверхностного слоя и удаление заусенцев в труднодоступных и перекрещивающихся каналах топливной аппаратуры.

По сведениям, приводимым фирмой Extrude Hone [2], которая является разработчиком и лидером в области АЭО, финишная обработка позволя-

ет увеличить мощность ДВС на 20 % и снизить потребление топлива на 30 % за счет улучшения аэродинамических характеристик сложнопрофильных деталей. Данное улучшение вызвано изменением условий контакта воздушного потока с поверхностью каналов ДВС. АЭО уменьшает величину дефектного поверхностного слоя и снижает его шероховатость, формирует такое направление шероховатости, которое совпадает с направлением аэродинамического потока при эксплуатации ДВС. В Российской Федерации по ряду причин абразивно-экструзионная обработка широкого применения не получила.

Во-первых, это сравнительно новая технология финишной обработки. Первый патент на этот способ был выдан в США в 1965 г. [3], а в СССР первые публикации появились, начиная с 1972 г. [4–9].

В СССР первые исследования в области финишной обработки наполненными полимерными средами были проведены во второй половине 70-х гг. прошлого века. Исследования были направлены на совершенствование способа и состава рабочей среды (10 авторских свидетельств), а также разработку устройств (15 авторских свидетельств). Результаты исследований обычно не опубликовывались, за исключением нескольких описаний изобретений и отдельных статей в журналах [10].

В первой половине 80-х гг. технология АЭО была внедрена в опытно-промышленное производство на нескольких предприятиях аэрокосмической отрасли для финишной отделки деталей ЛА, но отсутствие надежных теоретических основ процесса в условиях ухудшения социально-экономического состояния в СССР вынудило эти предприятия отказаться от внедрения метода в производство серийных изделий.

Процесс АЭО является сложным. При его реализации возникает целый ряд физических явлений, влияющих на качество и производительность обработки. Для внедрения АЭО в производство конкретных деталей необходимо провести достаточно большой объем экспериментальных исследований, связанных с определением оптимального состава рабочей среды и режимов ее перепрессовывания, обусловленных физико-механическими и геометрическими характеристиками обрабатываемых каналов. Необходимость дополнительных затрат на исследования, которые опираются только на опыт использования, а не на систематизированные теоретические основы процесса, является второй причиной низкого интереса производственников к внедрению процесса АЭО.

В лаборатории отделочных методов обработки Сибирского государственного аэрокосмического университета к настоящему времени накоплен большой объем экспериментальных и теоретических исследований АЭО деталей ЛА (рис. 2), а также технологической инструментальной оснастки, характеризующихся наличием сложнопрофильных поверхностей [11–15].



Рис. 2. *Абразивно-экструзионная обработка крыльчатки на установке УЭШ-100*

Результатами этих исследований являются рекомендации по технологии обработки конкретных деталей, основанные на полученных эмпирических зависимостях, связывающих основные параметры технологического процесса с характеристиками поверхностного слоя – величиной и направлением шероховатости и микротвердости [16].

Основными параметрами технологического процесса АЭО являются объем рабочей среды, давление гидравлической системы установки в продавливающем и принимающем рабочем цилиндре установки для АЭО, величина (дисперсность) и процентное содержание (концентрация) абразивного зерна в рабочей среде, его физико-механические характеристики, а также количество циклов обработки. Большое влияние на качество и производительность процесса оказывают геометрические характеристики обрабатываемого канала – его радиус и длина, площадь и периметр поперечного сечения, а также исходные физико-химические свойства поверхностного слоя.

Практика показывает, что не всегда возможно использовать имеющие эмпирические зависимости для технологии АЭО деталей с другими геометрическими характеристиками. В этом случае наблюдается изменение скорости потока и давления среды в обрабатываемом канале, что ведет к изменению условий обработки. Эти изменения подчиняются определенным закономерностям, определяющим реологические свойства среды. Поэтому качество и производительность АЭО зависят как от характеристик обрабатываемых каналов, так и от реологических свойств среды.

В настоящее время в нашей стране абразивно-экструзионная обработка в основном применяется в

производстве металлургической оснастки для финишной обработки формирующих отверстий пресс-матриц, форм, фильер и штампов, поскольку состояние их поверхности определяет качество поверхностного слоя и товарный вид получаемых изделий.

Анализ технологического процесса АЭО, применяемого на ОАО «КРАМЗ», г. Красноярск, для финишной обработки пресс-матриц показал, что рабочая среда была выбрана без учета особенностей каналов обрабатываемых деталей, поверхность которых после операций формообразования и термообработки имела твердость 50...55 HRc.

Основой применяемой среды являлась смесь борсилоксанового олигомера и мыломасляного геля с добавлением абразивного зерна. Этот состав [7], обладающий повышенной текучестью, разрабатывался для отделки узких и длинных каналов с малой площадью поперечного сечения. Рабочие среды данного состава характеризуются невысокой жесткостью, низкой стойкостью к тепловому старению, более сильной зависимостью вязкости от температуры, чем среды на основе кремнийорганического каучука СКТ [17]. Время обработки одной детали средой такого состава составляло 600...620 мин.

Пресс-матрицы, применяемые на ОАО «КРАМЗ», имеют такое соотношение площади обрабатываемой поверхности канала к площади его поперечного сечения, которое позволяет использовать более жесткие рабочие среды с повышенным содержанием абразивного зерна.

Применение рабочей среды другого состава [17], определенного из опыта обработки деталей ЛА, позволило сократить время обработки до 12 мин на одну деталь. Использование рабочей среды, наполненной абразивными зернами различной дисперсности, уменьшило операционное времени на обработку до 6 мин.

Содержание каждой фракции было рассчитано по определенной зависимости, позволившей получить более упакованную структуру рабочей среды, повысив ее упругие свойства и жесткость закрепления зерна в основе [13].

Основной целью теоретических исследований в области АЭО является разработка математических моделей, позволяющих рассчитать характеристики отдельных составляющих процесса, таких как скорость, давление и направление потока среды в обрабатываемом канале, взаимодействие единичного абразивного жгута с обрабатываемой поверхностью в зоне контакта, а также взаимосвязь реологии среды с контактными явлениями.

В [18] приведены теоретические предпосылки, основанные на существующем подходе к описанию процесса АЭО, а также практические результаты и перспективы применения этого процесса для повышения производительности обработки, улучшения качества продукции, снижения ее себестоимости. Основным недостатком такого подхода является то, что он не дает возможности установить взаимосвязь между отдельными составляющими процесса механической обработки.

Так, взаимодействие с поверхностью канала, и реология рабочей среды построены на модели течения бингамовских пластиков, которая не учитывает наличие нормальных напряжений при сдвиговом течении полимера, т. е. его упругих свойств. Данная модель дает возможность рассчитать расходно-напорные характеристики течения, но не параметры наряжено-деформированного состояния среды.

При использовании такой модели предполагается, что перемещение абразивного зерна у стенки осуществляется потоком жидкости, и сила P_z, перемещающая абразивное зерно, определяется перепадом давления ΔP_1:

$$P_z = \Delta P^1 2\rho,$$

где P – давление среды в сечении канала на элементарной длине зерна с условным радиусом ρ.

Величина силы P_y, прижимающей зерно к поверхности, считается равной

$$P_y = PS_к,$$

где S_k – площадь контакта абразивного зерна с обрабатываемой поверхностью.

В работе [18] отсутствует методика теоретического расчета давления среды в сечении канала P в зависимости от его длины. Используемые в расчетах значения P определяют экспериментально для каждого вида обрабатываемого канала.

Взаимодействие единичного абразивного зерна в зоне контакта с обрабатываемой поверхностью построено с использованием зависимостей, полученных для гидроабразивной обработки, шлифования, алмазной обработки и трения в условиях пластического контакта. Критерии выбора модели контакта не приведены, т. к. не исследована кинематика абразивного зерна в рабочей среде.

До настоящего времени нет работ, позволяющих оценить степень закрепленности абразивного зерна при АЭО в зависимости от вязкоупругих свойств рабочей среды, а следовательно и вид контакта зерна с обрабатываемой поверхностью.

По сути, авторами [18] рассмотрены два предельных случая закрепления зерна при обработке, при которых коэффициент закрепления $k_{кз}$ равен 0 или 1.

При коэффициенте $k_{кз}$=0, при котором зерно находится в потоке вязкой жидкости, не способной к накоплению упругих деформаций, реализуется процесс гидроабразивной обработки. Основной съем материала осуществляется за счет энергии, возникающей при соударении зерна с обрабатываемой поверхностью. Величина составляющих сил резания зависит от скорости и угла соударения, физико-механических свойств контактирующих материалов, а также микрогеометрии зерна. Скорость потока среды при гидроабразивной обработке в среднем на три порядка больше, чем определяемая при АЭО (экструзионном хонинговании).

В другом предельном случае $k_{кз}$=1 – жестком закреплении, характерном для шлифования и алмазной обработки закрепленным зерном, величины нормального давления значительно выше, чем определяемые при АЭО (ЭХОН).

Допущенные упрощения модели привели к тому, что по результатам расчета по предложенной в работе [18] модели контакта делается предположение, что при контактном взаимодействии абразивного зерна с поверхностью обработки невозможно осуществить не только резание на микро- и субмикроуровне, но даже пластическое оттеснение материала, т. к. расчетная сила P_{yz} составляет ~$2 \cdot 10^{-6}$ Н.

На основании этого факта, в теоретических предпосылках взаимосвязи реологии рабочей среды с контактными явлениями при взаимодействии абразивного зерна с поверхностью обработки, делается вывод, что кроме гидравлических сил должны существовать силы внутреннего взаимодействия абразивных зерен в потоке рабочей среды.

Далее в работе [18] предполагается, что от перемещающегося центра потока – ядра абразивного «жгута», формируются комплексы абразивных зерен, которые устремляются к поверхности обработки, закрепляя абразивное зерно на поверхности «жгута». Это утверждение далее не подкрепляется ни теоретически, ни экспериментально. Поэтому по предложенной модели невозможно определить не только действительные величины сил резания, возникающих при обработке, но и разработать функциональные зависимости, позволяющие теоретически рассчитать шероховатость обработанной поверхности в зависимости от параметров технологического процесса.

Отсутствие теоретических основ процесса, построенных на базе общепринятых представлений в области трибологии и реологии, не дает возможность оценить границы применимости способа с научной точки зрения. Это третья и, пожалуй, основная проблема, возникающая при внедрении АЭО в производство.

Для создания теоретических основ необходимо установить степень влияния физических явлений, которые возникают при контактных взаимодействиях рабочей среды с поверхностным слоем, и провести анализ применимости теории этих явлений для описания процесса АЭО с учетом особенности их протекания.

Проведен ряд исследований, позволивших установить зависимость вязкостных свойств рабочих сред от степени их наполнения, дисперсности наполнителя и напряжений сдвига [19]. Использование модели вязкоупругой среды позволило установить влияние нормальных напряжений, возникающих при сдвиговом течении среды на условия контакта единичного абразивного зерна, а также разработать методологию определения параметров сдвигового течения рабочей среды для абразивно-экструзионной обработки.

Все это позволило установить особенности реологии среды при абразивно-экструзионной обработке цилиндрического канала [20]. В отличие от модели бингамовского пластика, реализующей только вязкое течение, при сдвиговом течении среды возникают помимо касательных и значительные нормальные напряжения, характеризующие упругие свойства материала. Именно это свойство неньютоновских сред имеет большое влияние на качество и производительность процесса обработки.

Результирующая касательных и нормальных напряжений, воздействующих на абразивное зерно, наряду с геометрией контакта и физико-механическими свойствами поверхности и зерна, определяет силы, возникающие при их взаимодействии, а также взаимное приближение контактирующих тел и вид их контакта.

Теоретические исследования на основе модели вязкоупругой среды позволит учесть все особенности сдвигового течения наполненной рабочей среды и кинематику абразивного зерна, правильно выбрать схему контакта абразивного зерна с неровностью. Использование с учетом выявленных условий контакта положений контактных задач в трибологии, возникающих при контактировании шероховатых тел, позволит дать теоретическую оценку интенсивности и равномерности изменения размеров обрабатываемого канала и его шероховатости.

Данный подход даст возможность создать теоретические основы процесса абразивно-экструзионной обработки канала цилиндрической формы. Дальнейшие исследования должны установить влияние геометрии обрабатываемых каналов на производительность и качество обработки сложнопрофильных поверхностей, а также вывить особенности термодинамических процессов при АЭО.

Исходя из этого подхода, необходимо дать оценку технологической применимости способам, интенсифицирующим процесс АЭО труднообрабатываемых деталей за счет наложения дополнительных вибраций [21–23] и создания дополнительного сопротивления течению среды [24], а также способам с выравниванием формы обрабатываемого канала [9] и обработки каналов большой длины с малой площадью поперечного сечения [25].

Разработка функциональных зависимостей, позволяющих с использованием математических моделей реологии наполненных неньютоновских сред и контактных взаимодействий шероховатых тел установить взаимосвязь между основными параметрами технологического процесса, производительностью и равномерностью АЭО. Это дает возможность теоретически оценить производительность, технологическую себестоимость и надежность процесса механической обработки для широкой номенклатуры деталей без проведения большого объема экспериментальных исследований с позиций обеспечения качества поверхностного слоя деталей машин [26].

Особенную значимость приобретает такая разработка при производстве деталей из труднообрабатываемых материалов, каналов большой длины или переменной формой поперечного сечения, деталей имеющих низкое качество поверхностного слоя после операций электроэрозионной обработки или формообразования специальными методами литья.

Вывод. В машиностроении существует класс сложнопрофильных деталей, для которых отсутствует надежный способ финишной обработки. Данное обстоятельство вынуждает конструкторов либо снижать требования, предъявляемые к качеству их поверхности, либо применять сборные конструкции, что ведет к росту себестоимости изготовления и снижению надежности изделия в целом.

Внедрение в широкое промышленное производство новых технологий финишной обработки, таких как абразивно-экструзионная обработка, сдерживается отсутствием систематизированных теоретических основ процесса, что не дает возможность оценить границы применимости способа с научной точки зрения.

Таким образом, возникает новая научная проблема – обоснование выбора теоретических основ процесса абразивно-экструзионной обработки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Воробей В.В., Логинов В.Б. Технология производства жидкостных ракетных двигателей. – М.: Изд-во МАИ, 2001. – 496 с.
2. Extrude hone corporation [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http:// www.extrudehone.com, свободный
3. Пат. 3521412 США. МКИ B24B 1/00, 19/00. Способ снятия заусенцев и отделки поверхностей абразивной массой / Р.У. МакКарти. Заявлено 05.11.65; Опубл. 21.07.1970, Бюл. ИСМ № 10.
4. Pat. 3634973 U.S. ISC B24B 27/00. Apparatus for abrading by extrusion and abrading medium / R.W. McCarty. 18.01.1972. – T. 894. – № 3.
5. Pat. 3802128 U.S. ISC B24B 7/00, 9/00. Machine for abrading by extruding / R.J. Minear, N.P. Nokovich. 09.04.1974. – T. 921. – № 2.
6. Pat. 3819343 U.S. ISC B24B 7/00. Medium for process for honing by extruding / R.W. McCarty. 25.06.1974. T. 921 № 2.
7. Пат. 4087943 США. МКИ B24B 1/00. Способ шлифования узких каналов / Е.П. Кеннет. Опубл. 09.05.78; Бюл. ИСМ № 12, вып. 27, 1978.
8. Rhoades L.J. Abrasive Flow Machining with Non-So-Silly Putty // Metal Finish. – 1987. – T. 5. – № 7. – P. 27–29.
9. Pat. 4936057 U.S. ISC B24B 57/02. Finish machining the surface of irregularly shaped fluid passages / L.J. Rhoades. 26.06.1990. – T. 1115. – № 4.
10. Сысоев С.К., Тимченко А.И., Левко В.А. Технология отделки РК-профильных отверстий абразивно-экструзионной обработкой // Вестник машиностроения. – 1991. – № 1. – С. 65–67.
11. Сысоев С.К. Исследование и разработка рациональных методов технологического обеспечения точности: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Красноярск: НИИТМ, 1978. – 21 с.
12. Лубнин М.А. Разработка и внедрение технологии экструзионного шлифования труднодоступных поверхностей деталей: Автореф. дис ... канд. техн. наук. – М.: НИИТМ, 1987. – 18 с.
13. Левко В.А. Интенсификация процессов абразивно-экструзионной обработки деталей летательных аппаратов: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Красноярск: САА, 1998. – 20 с.
14. Сысоев А.С. Абразивно-экструзионное улучшение качества внутренних поверхностей каналов после электроэрозионной обработки в деталях летательных аппаратов: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Красноярск: СибГАУ, 2002. – 20 с.
15. Снетков П.А. Совершенствование технологии абразивно-экструзионной обработки каналов в деталях летательных аппаратов: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Красноярск: СибГАУ, 2003. – 19 с.
16. Сысоев А.С., Сысоев С.К., Лубнин М.А. Абразивно-экструзионная обработка деталей // Технология машиностроения – 2002. – № 4. – С. 28–32.
17. А.с. 1379063 СССР. МКИ B24B 39/02. Способ чистовой обработки сквозных отверстий деталей / С.К. Сысоев. Заявлено 30.10.85; Опубл. 07.03.88, Бюл. № 9. – 3 с.: ил
18. Сысоев С.К., Сысоев А.С. Экструзионное хонингование деталей летательных аппаратов: теория, исследования, практика. – Красноярск: СибГАУ, 2005. – 220 с.
19. Левко В.А. Исследование технологических характеристик рабочих сред для абразивно-экструзионной обработки // Перспективные материалы, технологии, конструкции, экономика: Сб. научных трудов / Под ред. В.В. Стацуры. – Красноярск, 2000. – Вып. 6. – С. 276–278.
20. Левко В.А. Особенности реологии рабочей среды при абразивно-экструзионной обработке // Вестник СибГАУ. – 2005. – Вып. 7. – С. 96–100.
21. А.с. 738837 СССР. МКИ B24B 1/00. Способ снятия заусенцев и отделки поверхностей абразивной массой / А.И. Попенко, В.М. Мигунов, П.В. Ширкевич, А.И. Ковган. Заявлено 16.12.1977; Опубл. 05.06.80, Бюл. № 21. – 6 с.: ил.
22. А.с. 738838 СССР. МКИ B24B 1/00. Способ снятия заусенцев и отделки поверхностей абразивной массой / А.И. Попенко, А.И. Ковган, П.В. Ширкевич, В.М. Мигунов. Заявлено 02.01.78; Опубл. 05.06.80, Бюл. № 21. – 8 с.: ил.
23. А.с. 865643 СССР. МКИ B24C 3/06. Устройство для обработки деталей абразивной массой, подаваемой под давлением / А.Н. Шаповал, М.Н. Пивоваров, Г.Р. Золотарев, В.А. Залевский, А.А. Зленко, А.А. Сытник, Н.А. Федотьев. Заявлено 10.01.80; Опубл. 28.09.81, Бюл. № 35. – 2 с.: ил.
24. А.с. 1641591 СССР. МКИ B24B 31/116. Способ обработки деталей абразивной массой / С.К. Сысоев, М.А. Лубнин, В.Ф. Калинин. Заявлено 13.01.88; Опубл. 05.06.91, Бюл. № 14. – 3 с.: ил.
25. Сысоев А.С., Сысоев С.К., Левко В.А., Снетков П.А., Зверинцева Л.В. Исследование процесса хонингования заготовок трубопроводов для летательных аппаратов // Вестник СибГАУ. – 2005. – Вып. 6. – С. 248–252.
26. Суслов А.Г. Качество поверхностного слоя деталей машин. – М.: Машиностроение, 2000. – 320 с.